第39卷　第6期
2022年11月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

祁连山一次降水过程云模式模拟参数的选择及微物理结构特征分析

张文煜[1]，　任　婧[1,2]，　付丹红[2]，　孔令彬[1]，　田　硕[1]

(1. 郑州大学计算机与人工智能学院/地球科学与技术学院，河南 郑州　450001；
2. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室(LACS)，北京　100029)

摘　要： 使用实测数据结合云模式，对祁连山一次典型层积云系降水过程进行数值模拟研究，探讨参数选择对模拟结果的影响，并对其微物理结构特征进行分析。结果表明：祁连山云模式的最优参数是Thompson方案；各种水成物含量分布基本呈单峰型，01:00 4.5 km附近的霰混合比和雪混合比的值分别可达0.1 g·kg^{-1}和0.7 g·kg^{-1}，此高度层上有较为丰沛的过冷水。从5种水成物的空间分布及时间相关性来看，霰和雪的融化对雨水的形成有主要贡献；垂直方向上云系呈现“催化-供给”的分层结构，8 km高度以上的最高层为冰晶和雪的共存区，0 ℃层高度(4.5 km)以上的过冷区，同时存在霰粒子，云水和雨水。此云结构有利于降水的形成，有利于进行祁连山人工增雨作业。

关键词： 祁连山；云模式；模拟参数；微物理结构；特征

降水是指大气中的水汽冷凝后以固态或液态的形式降落到地面的过程[1]，对全球水和能量循环有着极为重要的作用[2]。目前，全球水资源短缺严重[3]，尤其是西北、华北中西部地区降水偏少。人工增雨作业开发空中云水资源是解决水资源短缺问题的重要途径[4]，而层积云系是人工增雨的主要作业云系[5]。层积云系的动力，热力结构复杂[6]，因此，研究层积云系的微物理结构特征具有十分重要的意义。

祁连山位于我国西北干旱半干旱地区腹地[3]，南麓接青藏高原，北临河西走廊[7]，共有冰川3306条[8]，山区最大年降水量达800 mm，是河西走廊平原地带降水量的4~16倍，是名副其实的“高山水塔”[3]。祁连山空中云水资源丰富，加上独特的地形地貌条件，具有极大的云水资源开发潜力。

近年来，随着大气探测技术的发展，卫星、飞机、微波辐射计等仪器在层积云系微物理结构特征的分析方面得到了应用。党娟等[9]利用飞机探测资料对甘肃地区夏季一次层积云系的微物理结构特征进行分析，发现层积云顶附近的冷云过程会增强云水的碰并,有利于降水形成；李德俊等[10]利用雨滴谱、多普勒雷达、GPS/MET水汽等观测资料,对武汉的一次人工增雨作业过程进行分析，发现层状云是进行人工增雨作业的较好云系，其内部有较多的过冷水；亓鹏等[11]利用华北太行山地区的层积云系降水过程的地面雷达观测和飞机资料，对该云系的结构特征进行分析，发现对流泡中的过冷水含量较高，其降水的形成符合“播撒-供给”机制；庞朝云等[12]利用祁连山夏季一次降水过程的探空资料，自动站资料以及雨滴谱资料，对该地区的云微物理特征进行分析，发现祁连山的降水主要是由小雨滴组成的，且海拔较高的山区雨滴更多；程鹏等[7]利用祁连山夏季一次云降水过程的飞机观测数据，发现祁连山地区云水含量丰富，南北坡云系的微物理结构特征的差异比较明显。可以看到，现有的观测手段使我们对层积云系的微物理结构特征有了更多认识。

数值模式能较好刻画云系发展和降水产生的过程,被广泛应用于云-降水过程研究[13]。而参数的

收稿日期： 2022-04-30；　**修订日期：** 2022-06-17
基金项目： 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0104)和西北区域人工影响天气能力建设项目研究试验项目(ZQC-R18208)资助
作者简介： 张文煜(1964-)，男，教授，主要从事大气探测与大气物理方面的研究. E-mail: zhangwy@zzu.edu.cn
通讯作者： 任婧. E-mail: maximusrj@163.com

选择是数值模拟的关键。Xue等[14]发现,不同维度或尺度的模式均能模拟出层-积云系的液态水、对流云中的对流过程及云系的微物理特征。李安泰等[15]使用WRF3.2选用Morrison双参数方案、Lin方案和Kessler方案对舟曲地区进行了暴雨数值模拟研究,发现Kessler方案的模拟效果最好,雨水碰并云水过程是该云系降水的主要微物理过程;朱格利等[16]使用WRF3.4选用WDM5、WSM3等8种云微物理参数化方案对华南地区一次暴雨过程进行了数值模拟研究,发现WSM5方案的整体模拟效果最好;丁明月等[17]使用WRF3.8采用WDM6方案、Thompson方案、WSM6方案和Lin方案4种云微物理参数化方案对新疆地区的暴雨过程进行模拟,发现Thompson方案的模拟效果略优于其他方案;周志敏等[18]使用WRFV3.4采用Thompson、Morrison和MY云微物理参数化方案对一次暴雨过程进行了数值模拟,发现Thompson方案可以模拟出较强的上升气流和局地环流系统变率,雨滴搜集云滴、冰相粒子融化是雨滴增长的主要源项,蒸发则是其最主要的汇项;邵元亭等[19]利用ARPS数值模式对祁连山区夏季的一次典型地形云降水过程进行模拟研究,发现模式能够模拟出地面降水分布及其发展演变特征,祁连山北坡地形的抬升作用是祁连山云系降水的主要动力机制;段海霞等[20]使用MM5中尺度模式,选用Schultz方案、Dudhia方案、Reisner方案和Reisner2 4种不同云微物理参数化方案对祁连山区夏季的一次降水过程进行模拟研究,发现Reisner2方案的模拟效果略强于其他参数化方案,云水、雨水、雪、霰和冰晶均参与碰并碰冻的过程;魏倩等[21]使用数值模式WRF-Chem3.4,结合观测资料评估了MYJ、YSU、MYNN2.5、BouLac和QNSE 5种边界层参数化方案对西北地区一次沙尘天气过程模拟效果的影响,发现YSU和BouLac方案模拟的地表沙尘天气较为准确。以上研究结果表明,不同地区云微物理参数化方案的选择对降水的模拟有较大的影响。

本文采用祁连山地形云人工增雨(雪)技术研究试验获取的实测数据,结合云模式,对祁连山一次典型层积云系降水过程进行模拟研究。探讨参数选择对模拟结果的影响,确定适用于祁连山的最优参数化方案,并在此基础上对典型层积云系的微物理结构特征进行分析,进一步明确祁连山人工增雨作业的指标。

1 数据和模式设计

1.1 数据

数据选取祁连山地形云人工增雨(雪)技术研究试验所示范围(100°~104°E,36°~39°N,图1)的不同下垫面(地形、地质、土壤和植被)的150个观测站2019—2020年实测小时降水数据。观测站包括国家站、区域站和野外站,其中国家站指的是根据全国气候分析和天气预报需要所设置的地面气象观测站,区域站指按照省(区,市)行政区划设置的地面气象观测站,野外站指项目研究需要建立的地面气象观测站。此外,还包括美国国家环境预报中心(NCEP)/美国国家大气研究中心(NCAR)提供的全球再分析数据FNL(Final Operational Global Analysis)。

1.2 模式设计

数值模式采用中尺度模式WRFV4.3,采用3层网格嵌套,嵌套空间范围见图2,嵌套网格模拟范围和网格分辨率见表1。模拟区域中心为(37°N,102°E),水平方向采用Arakawa C网格,垂直方向采用混合垂直坐标。以6 h一次1°×1°的NCEP/FNL再分析资料为初始场,云微物理过程分别采用Thompson方案[22]、Morrison2-mom方案、WSM3方案、WDM6方案。4种微物理方案的水凝物预报量见表2,其中qc、qr、qi、qs、qg分别为云水、雨水、冰晶、雪、霰的比含水量预报量,相应的数浓度预报量分别为nc、nr、ni、ns、ng。

为了定量评估2020年8月16日降水过程的24 h降水量的模拟结果,文章采用TS(Threat score),偏差(BIA),真实技巧评分(TSS)和公平T评分(ETS)4种评分作为评价标准。TS评分可以计算有降水时数值模式预报某一等级降水量的准确率,BIA用来评估预报降水的频率而并不考虑准确率。ETS评分弱化了参加统计的站点的多少对TS评分结果的影响。TSS主要用来全面评估降水分级预报的总效果。

TS、BIA、TSS和ETS评分的计算公式为:

$$\mathrm{TS} = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \tag{1}$$

$$\mathrm{BIA} = \frac{N_A + N_B}{N_A + N_C} \tag{2}$$

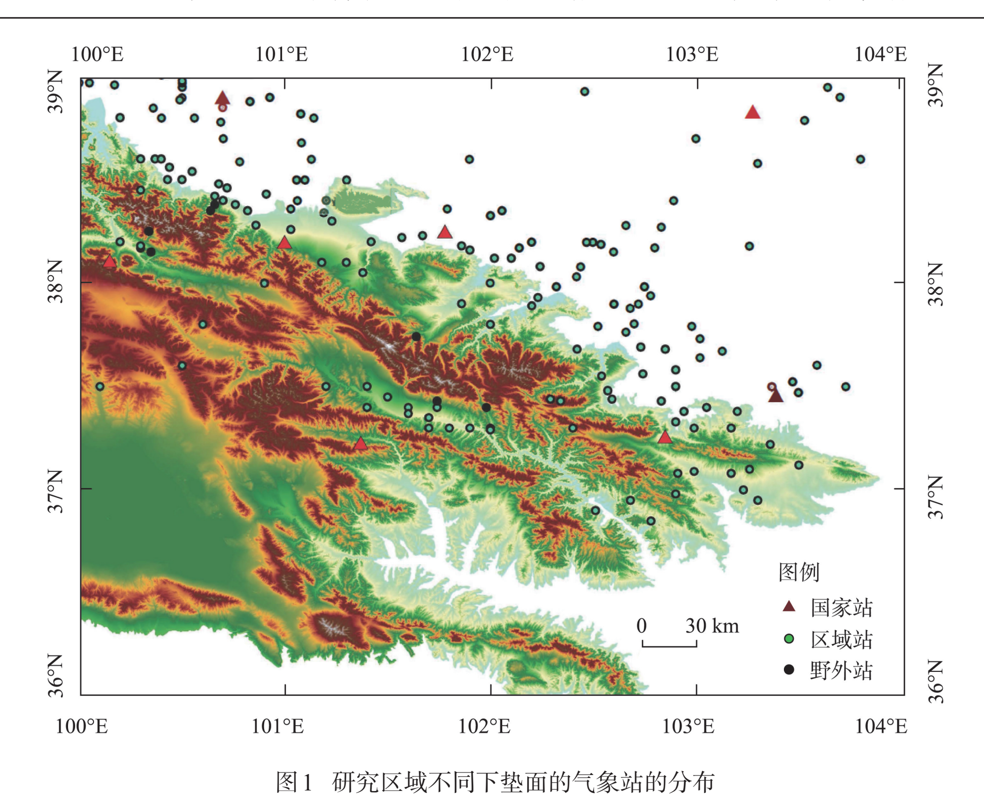
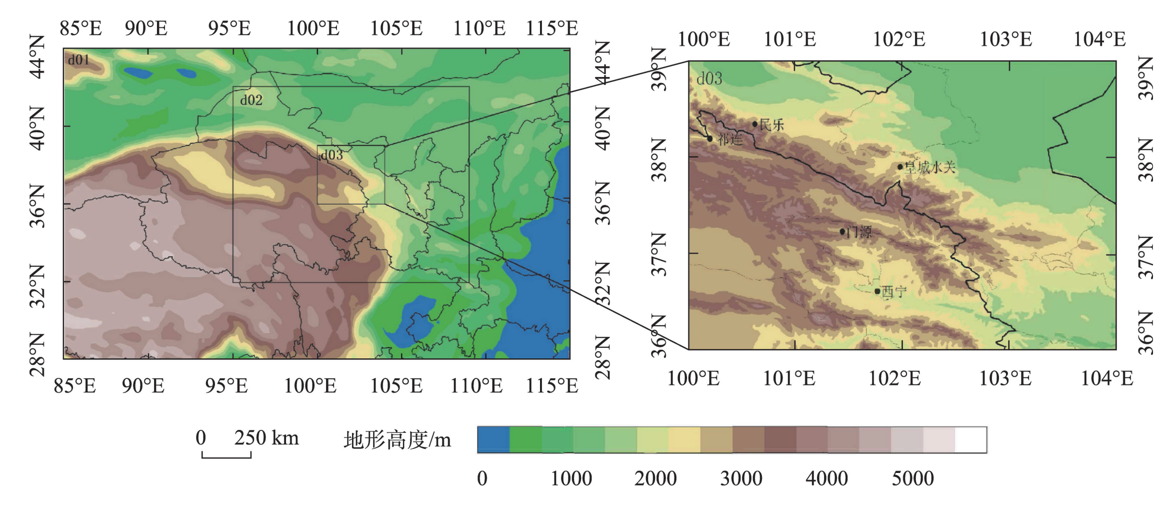


图1　研究区域不同下垫面的气象站的分布

Fig. 1　Distribution of meteorological stations on different underlying surfaces in the study area



注:d01,d02,d03分别表示WRF嵌套模拟的三层区域范围。

图2　WRF模拟嵌套区域

Fig. 2　WRF simulation nested area

$$\mathrm{ETS}=\frac{N_A-N_r}{N_A+N_B+N_C-N_r} \tag{3}$$

$$\mathrm{TSS}=\frac{N_A}{N_A+N_C}-\frac{N_B}{N_B+N_D} \tag{4}$$

式中:N_A为预报正确的站点数量;N_B为空报的站点数量(预报出现某量级的降水而观测非此量级降水的站点数);N_C为漏报的站点数(观测出现某量级的降水而预报非此量级降水的站点数);N_D为观测和预报均无降水过程的站点数量;Nr为随机预报的影响。

模拟的降水做统计检验的等级划分以及对应的站点个数见表3,依据本次降水事件最大降水量,将暴雨和大雨划分为同一个等级。选取WRF模拟中水平分辨率为3 km的第三重嵌套区域d03内的150个站点作为有效评分站点(图1)。

表1 实验设置

Tab. 1 Model setup

	d01	d02	d03
网格距	27 km	9 km	3 km
格点数	115×91	154×124	235×220
垂直层	34	34	34
模式顶高	50 hPa	50 hPa	50 hPa
积云参数化方案	Grell-Devenyi	Grell-Devenyi	Grell-Devenyi
边界层方案	BMJ	BMJ	BMJ
陆面过程方案	RUC	RUC	RUC
长波辐射方案	RRTM	RRTM	RRTM
云微物理方案	Thompson Morrison2-mom WSM3 WDM6	Thompson Morrison2-mom WSM3 WDM6	Thompson Morrison2-mom WSM3 WDM6
表面层方案	Eta	Eta	Eta
短波辐射方案	Goddard	Goddard	Goddard

注:d01、d02、d03分别代表模式嵌套的第一层、第二层、第三层。

表2 4种微物理方案的水凝物变量

Tab. 2 Condensate variables of four microphysical schemes

方案名称	质量浓度比	数浓度比
Morrison2-mom	qc,qr,qi,qs,qg	nr,ni,ns,ng
Thompson	qc,qr,qi,qs,qg	nr,ni
WSM3	qc,qi,qs	无
WDM6	qc,qr,qi,qs,qg	无

表3 观测站点降水等级划分

Tab. 3 Precipitation classification of observation stations

降水等级	24 h降水量/mm	站点个数
小雨/阵雨	0.1~9.9	121
中雨	10.0~24.9	24
大雨	25.0~99.9	5

2 祁连山区典型层积云系降水过程及模拟结果验证

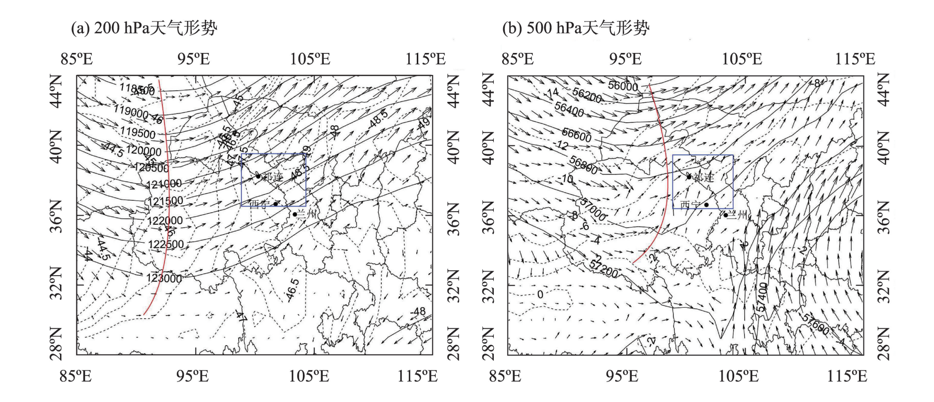
2.1 天气形势分析

由图3可以看出,西北地区由高空西风槽控制,槽内温度场落后于高度场,槽后有较强的冷空气输送,槽前有暖气流流入。观测区域处于高空槽前脊后的冷暖气流交汇处,由西南气流控制。受槽前西南暖湿气流和冷空气的共同影响,出现降水天气。

2.2 参数化方案的评估及检验

由图4可以看出,4种方案可以模拟出雨带的大致位置及强降水中心,位于祁连山南坡,该次降水过程属于小雨级别。模拟的降雨量及雨带范围较实测有所偏大,实测的强降水中心范围平均值为25.32 mm,而模拟的强降水中心范围平均值为38.83 mm。从4种方案模拟结果对比来看,Morrison2-mom和WSM3方案模拟的强中心较其他3种有所偏移,WDM6方案模拟的祁连山位置的降水中心较其他3种有所北移。

本文使用二维线性插值方法将2020年8月16日0:00—23:00 WRF模式模拟的Morrison2-mom,Thompson,WSM3,WDM6 4种参数化方案的小时降水资料插值到选取的150个观测站点上,并计算4种评分结果(图5)。Thompson、Morrison2-mom、WSM3以及WDM6的TS、BIA、TSS、ETS评分分别为:0.98、1.02、0.20、0.05、0.98、1.02、0、0、0.90、0.94、-0.08、-0.02,0.96、1.00、-0.01、-0.008。从TS评分(图5a)来看,0~24 h累积降水预报Morrison2-mom和Thompson方案优于WDM6和WSM3方案,模式总体上对小雨的预报比较好,而大雨的预报结果较差。从BIA评分(图5b)来看,0~24 h累积降水预报BIA评分Thompson和WDM6方案优于Morrison2-mom和WSM3方案。从TSS评分(图5c)来看,0~24 h累积降水预报ETS评分Thompson和WDM6方案优于Morrison2-mom和WSM3方案。从ETS评分(图5d)来看,0~24 h累积降水预报TSS评



注：高度场：黑色实线，单位：gpm；温度场：黑色虚线，单位℃；风场：黑色箭头，单位20 m·s^{-1}；槽线：红色曲线；研究区域：蓝色方框。

图3　2020年08月16日10:00 200 hPa和500 hPa天气形势

Fig. 3　At 10:00 on August 16, 2020 200 hPa and 500 hPa height field

(a) Thompson方案

(b) WDM6方案

(c) Morrison 2–mon方案

(d) WSM3方案

(e) CMORPH资料

100°E　101°E　102°E　103°E　104°E

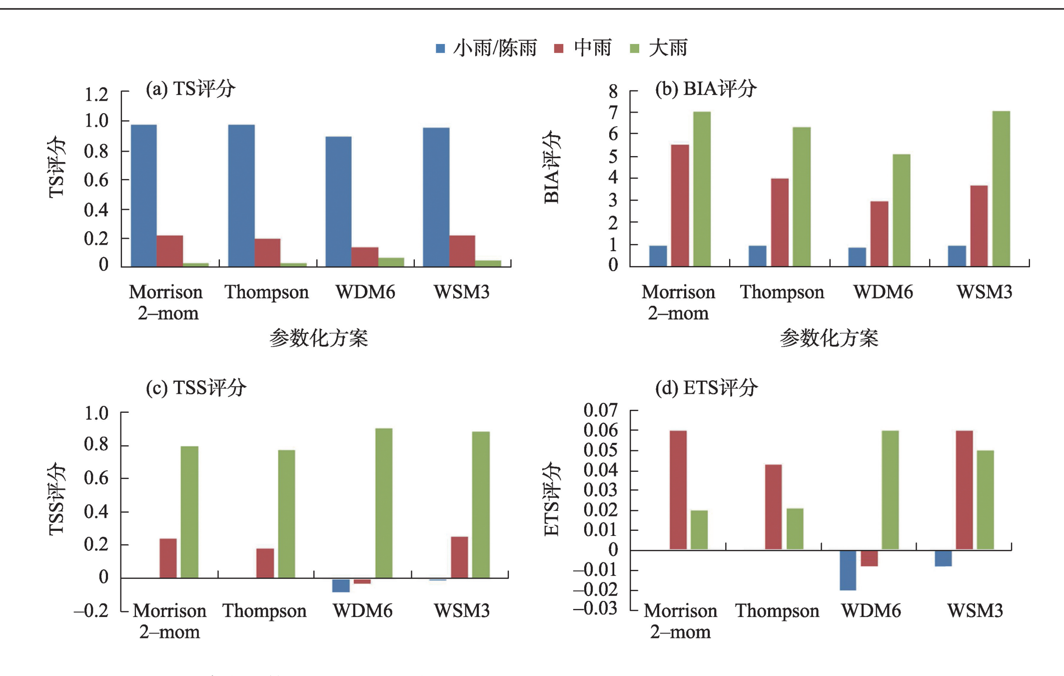
36°N　37°N　38°N　39°N

降水量/mm　0　8　16　24　32　40　48　56　64

0　55 km

图4　24 h模拟降水量与观测降水量对比

Fig. 4　Comparison of 24 h simulated precipitation and observed precipitation



注:24 h降水量等级划分:小雨/阵雨:0.1~9.9 mm;中雨:10.0~24.9 mm;大雨:25.0~99.9 mm。

图5 4种云微物理方案模拟不同等级24 h降水的TS、BIA、TSS、ETS评分

Fig. 5 Four cloud microphysics schemes simulate the TS, BIA, TSS and ETS scores of different levels of 24 h precipitation

分Morrison2-mom和Thompson方案优于WSM3和WDM6方案。综合TS、BIA、TSS和ETS评分结果,Thompson参数化方案的模拟效果要优于Morrison2-mom,WDM6和WSM3参数化方案,Thompson方案是适用于祁连山的最优参数化方案。

2.3 观测与模拟的雷达回波对比

图6是2020年8月16日00:00、09:00、19:00观测和模拟的雷达回波组合反射率的对比图。实测的雷达回波图可以看到,此次降水过程具有典型的层积云降水回波特征,在较均匀的回波层中镶嵌着柱状对流云回波,较大范围内,回波边缘呈现支离破碎,强度小于25 dBZ的层状云降水回波,层状云回波中镶嵌着团块状强回波,回波最大值为40 dBZ;影响祁连山区的降水系统自西南向东北方向移动,模拟的雷达回波也体现出了这个特点,雷达强回波的位置,模拟和实测比较接近。说明WRF模式对此次祁连山区层积云的降水过程模拟的比较精确,且随着地形高度的抬升,观测和模拟的雷达回波变化基本一致。

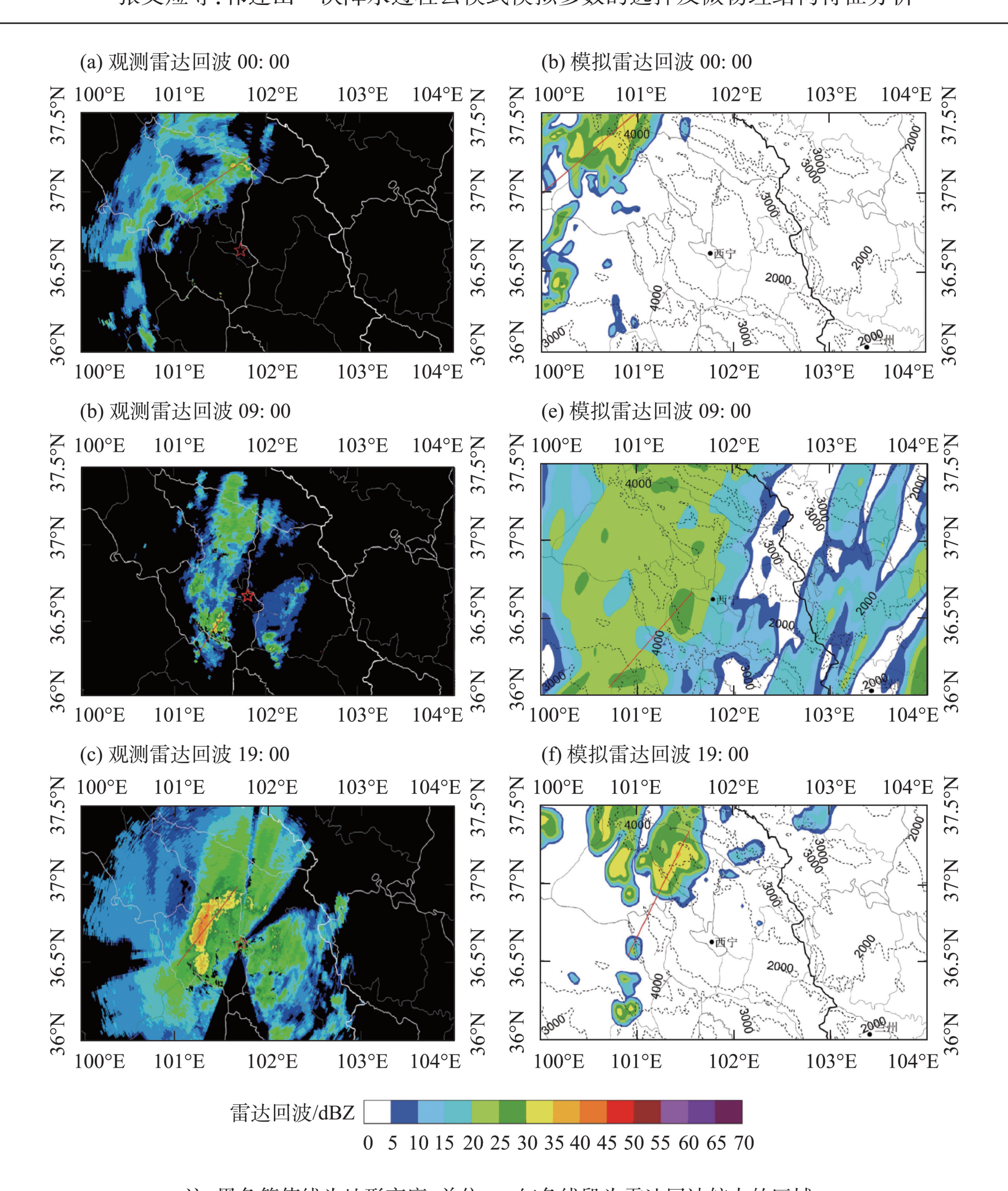
3 云微物理结构特征

3.1 水成物混合比时间变化

综上所述,下面将运用Thompson方案模拟结果分析祁连山层积云的微物理结构特征。研究区域强降水中心处M点(图7)模拟时段的云水,雨水,冰晶,雪,霰粒子5种水成物的比含水量区域平均值的时间高度的演变见图8。由图8可以看出,云中过冷云水分布高度在5~7 km(−3 °C~−12 °C),最大值出现在15日22:00,可达1.6 g·kg^{-1};雨水分布高度主要在0 °C层(4.5 km)以下,最大值出现在01:00左右,超过0.26 g·kg^{-1};冰晶所处的高度范围为10~14 km,最大值出现在03:00和06:00,约为0.003 g·kg^{-1};雪分布的高度范围为4~12 km,其值最大时位于7 km附近,最大值超过1.2 g·kg^{-1};霰粒子主要位于4~6 km高度,最大值位于4.5 km附近,出现在01:00左右,超过0.1 g·kg^{-1};各种水成物含量分布基本呈单峰型,01:00 4.5 km附近的霰混合比和雪混合比值分别可达0.1 g·kg^{-1}和0.7 g·kg^{-1},此高度层上的过冷水较为丰富,有利于霰淞和雪淞的增长,且雨水的分布和趋势与霰和雪基本一致,表明雪和霰的融化过程是雨水形成的主要来源。

3.2 水成物混合比垂直分布

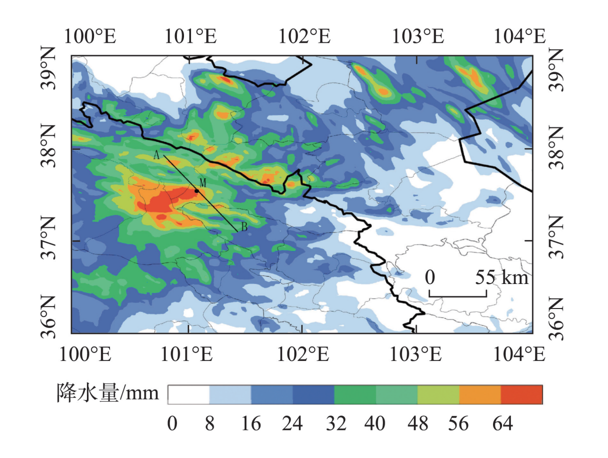
由图9可以看出,不同云区云体中的垂直微物理结构是不同的。在37.0°E,100.5°N上空有一个单体存在,云水区较厚,雨水含量达0.1 g·kg^{-1},但雪和霰的含量较低,其高层的冰晶也低于0.01 g·kg^{-1},而



注:黑色等值线为地形高度,单位:m;红色线段为雷达回波较大的区域。

图6 2020年8月16日(a、b、c)观测和(d、e、f)模拟的雷达回波组合反射率

Fig. 6 Observed and simulated radar echo combined reflectivity on August 16th, 2020



注:AB线段为沿强降水中心的剖线,M点为强降水中心。

图7 2020年8月16日降水量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of precipitation on August 16, 2020

地面产生了少量降水,表明在此阶段对降水有主要贡献的是暖云过程。在37.3°E,100.8°N上空云层较为深厚,存在多个单体,冰晶分布在9~14 km处,温度可达-50 °C。雪,霰范围的顶高与冰晶比较一致,最大值分别达到1.5 g·kg^{-1}和0.15×10^{-3}g·kg^{-1},雨水与雪和霰的分布比较一致,雨水混合比的大值区位于霰和雪大值区下方,表明雪和霰的融化过程对雨水的形成有主要贡献。冰晶和雪的共存区处于8 km高度以上的最高层,云水,雨水和霰粒子同时存在于0 ℃层高度4.5 km以上的过冷区。高层是冰相,0 °C层以上过冷区是冰水混合相,而暖区以液相为主的云体被称为“催化-供给”云,此种结构是重

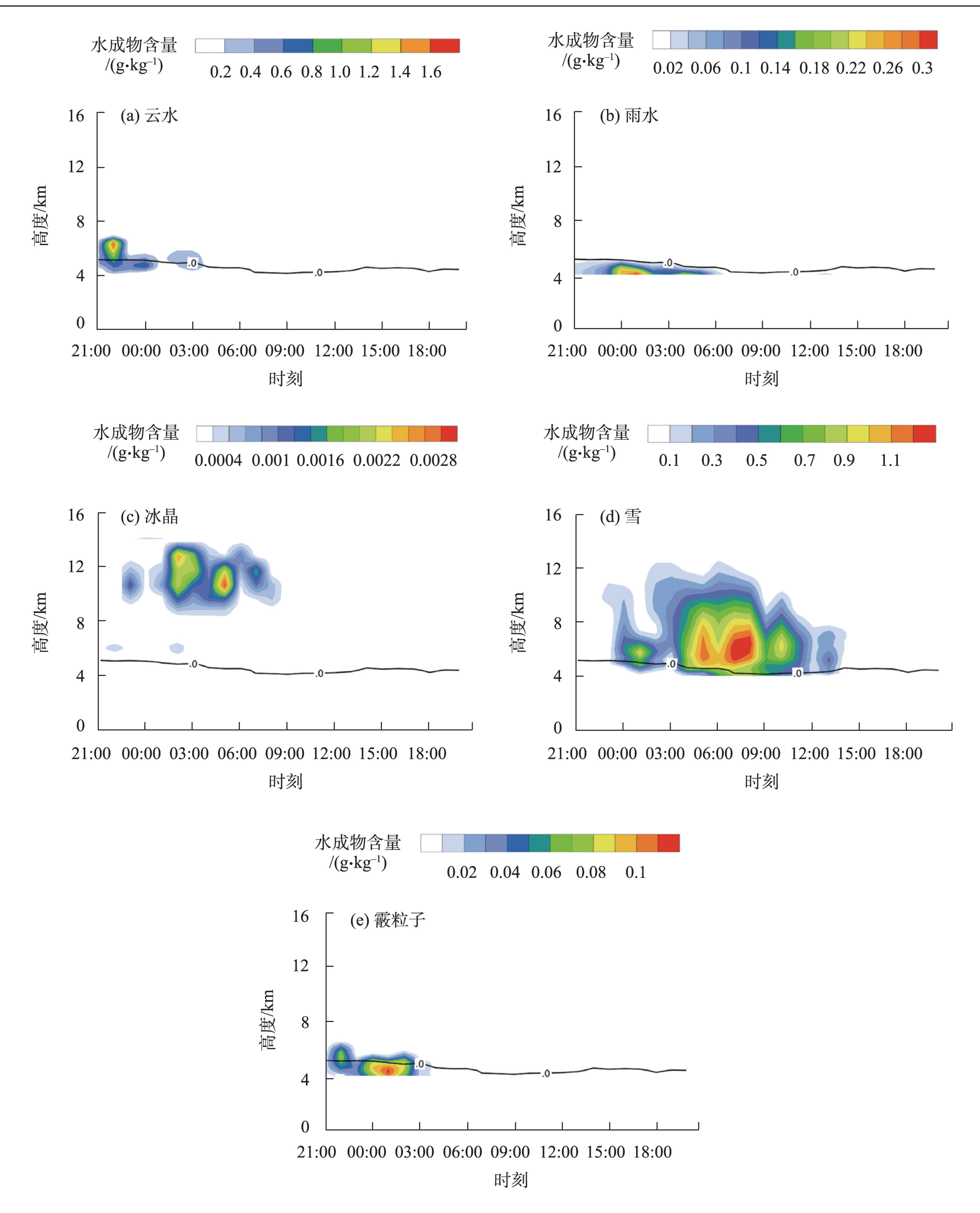


图8 2020年8月16日模拟的水成物区域平均值随时间高度的演变

Fig. 8 Evolution of simulated regional average value of hydrate with time height on August 16, 2020

要的人工增雨条件。

4 结 论

文章采用试验获取的实测数据结合云模式，对祁连山一次典型层积云系降水过程进行了模拟研究，分析了参数选择对模拟结果的影响，确定了适用于祁连山的最优参数化方案，并在此基础上对典型层积云系的微物理结构特征进行了分析，得出以下结论：

（1）WSM3、WDM6、Morrison、Thompson 等方案

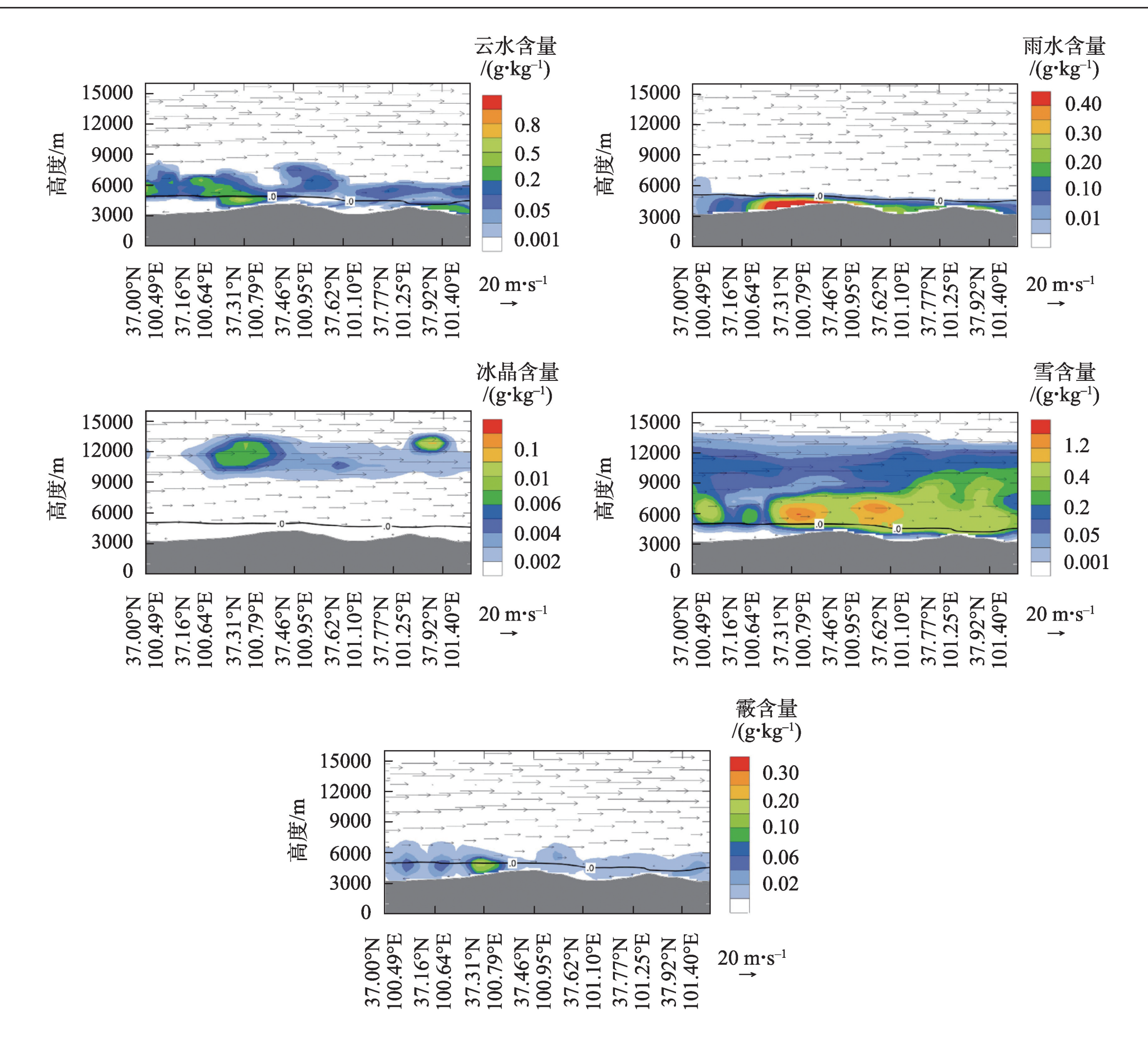


图9　2020年8月16日01:00各类水成物含量最大时刻垂直结构剖面

Fig. 9　At 01:00 on August 16, 2020, the vertical structure profile at the time when the content of various hydrates is the largest

可以模拟出雨带的位置以及强降水中心，模拟的降雨量及雨带范围较实测结果有所偏大。综合TS、BIA、TSS、ETS评分，祁连山云模式的最优参数选择是Thompson方案，评分分别为0.98、1.02、0.20、0.05；其次是Morrison2-mom，其TS、BIA、TSS、ETS评分分别为0.98、1.02、0、0。

（2）各种水成物含量分布基本呈单峰型，01:00，4.5 km附近的霰混合比和雪混合比的值分别可达0.1 g·kg⁻¹和0.7 g·kg⁻¹，此高度层上的过冷水比较丰富，极其有利于霰淞和雪淞的增长，且雨水的分布和变化趋势与雪、霰比较一致，可见，雪和霰的融化过程是雨水的形成的主要来源。

（3）云体在垂直方向上呈现"催化-供给"的分层结构。冰晶和雪的共存区处于8 km高度以上的最高层，云水、雨水和霰粒子同时存在于0 ℃层高度4.5 km以上的过冷区，此云结构有利于降水的形成，有利于进行祁连山人工增雨作业。同时发现，在云系的不同部位，水凝物垂直微物理结构也存在着一定的差异，会影响其对降水产生的贡献。

参考文献(References)：

[1]　王芬, 曹杰, 李腹广, 等. 贵州不同等级降水日数气候特征及其与降水量的关系[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 145-154. [Wang Fen, Cao Jie, Li Fuguang, et al. Climate characteristics of rain days and the relationship between rain days and total amount of precipitation in Guizhou[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(1): 145-154.]

[2]　徐东坡, 李金明, 周祖昊, 等. 1956—2018年中国降水特征的时空分布规律研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 20-27. [Xu Dongpo, Li Jinming, Zhou Zuhao, et al. Study on the spatial and temporal distribution law of precipitation characteristics in China

from 1956 to 2018[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10): 20-27.]

[3] 尹宪志, 王毅荣, 徐文君, 等. 祁连山空中云水资源开发潜力研究新进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(6): 134-140. [Yin Xianzhi, Wang Yirong, Xu Wenjun, et al. Recent progress in research on potential for the development of cloud water resources over Qilian Mountains Area[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(6): 134-140.]

[4] 刘卫国, 陶玥, 周毓荃, 等. 基于飞机真实轨迹的一次层状云催化的增雨效果及其作用机制的模拟研究[J]. 气象学报, 2021, 79(2): 340-358. [Liu Weiguo, Tao Yue, Zhou Yuquan, et al. Simulation of stratiform cloud seeding, its rainfall enhancement effect and mechanism study based on a real trajectory of aircraft[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(2): 340-358.]

[5] 唐林, 李琼, 黎祖贤, 等. 一次积层混合云云系微物理结构数值模拟与增雨条件分析[J]. 干旱气象, 2020, 38(1): 100-108. [Tang Lin, Li Qiong, Li Zuxian, et al. Numerical simulation of mircophysical structure of a mixed convective stratiform cloud system and analysis of seeding conditions[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(1): 100-108.]

[6] 何晖, 高茜, 刘香娥, 等. 积层混合云结构特征及降水机理的个例模拟研究[J]. 大气科学, 2015, 39(2): 315-328. [He Hui, Gao Qian, Liu Xiang'e, et al. Numerical simulation of the structural characteristics and precipitation mechanism of stratiform clouds with embedded convections[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(2): 315-328.]

[7] 程鹏, 罗汉, 刘琴, 等. 基于地基GPS的祁连山大气可降水量特征[J]. 气象, 2021, 47(9): 1135-1145. [Cheng Peng, Luo Han, Liu Qin, et al. Characteristics of precipitable water vapor in Qilian Mountains based on ground-based GPS data[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(9): 1135-1145.]

[8] 付双喜, 张洪芬, 杨丽杰, 等. 地形影响下祁连山北麓不同类型降水特征对比分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1226-1234. [Fu Shuangxi, Zhang Hongfen, Yang Lijie, et al. Comparative analysis of different types of precipitation characteristics in the northern foot of Qilian Mountain under the influence of topography[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1226-1234.]

[9] 党娟, 刘卫国, 陶玥, 等. 一次降水性层积云系的微物理特征分析[J]. 高原气象, 2016, 35(6): 1639-1649. [Dang Juan, Liu Weiguo, Tao Yue, et al. Analysis of cloud microphysical characteristics on a precipitation stratocumulus[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(6): 1639-1649.]

[10] 李德俊, 唐仁茂, 江鸿, 等. 武汉一次对流云火箭人工增雨作业的综合观测分析[J]. 干旱气象, 2016, 34(2): 362-369. [Li Dejun, Tang Renmao, Jiang Hong, et al. Analysis on comprehensive observation of an artificial precipitation enhancement operation for convective clouds in wuhan[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(2): 362-369.]

[11] 亓鹏, 郭学良, 卢广献, 等. 华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观测研究:对流云/对流泡和融化层结构特征[J]. 大气科学, 2019, 43(6): 1365-1384. [Qi Peng, Guo Xueliang, Lu Guangxian, et al. Aircraft measurements of a stable stratiform cloud with embedded convection in eastern Taihang Mountain of North China: Characteristics of embedded convection and melting layer structure[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(6): 1365-1384.]

[12] 庞朝云, 李宝梓, 张丰伟, 等. 祁连山北坡一次人工增雨降水过程雨滴谱特征分析[J]. 气象科技, 2021, 49(4): 621-628. [Pang Chaoyun, Li Baozi, Zhang Fengwei, et al. Raindrop spectrum characteristics of an artificial precipitation enhancement process on northern slope of Qilian Mountains[J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(4): 621-628.]

[13] 侯文轩, 华维, 郭艺媛, 等. 青藏高原那曲地区一次对流云降水的数值模拟[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(3): 18-28. [Hou Wenxuan, Hua Wei, Guo Yiyuan, et al. Numerical simulation of a convective cloud precipitation at Naqu on the Tibetan plateau[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2020, 40(3): 18-28.]

[14] Xue L, Tenssendorf S, Nelson E, et al. Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part II: 3D simulations of actual seeding events and sensitivity tests[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2013, 52(6): 1458-1476.

[15] 李安泰, 何宏让. 不同云微物理参数化方案对舟曲"8.8"暴雨过程模拟的影响[J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(3): 9-16. [Li Antai, He Hongrang. Impact of different cloud microphysical parameterization schemes on numeric simulation results of "8.8" rainstirm process in Zhouqu[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, 34(3): 9-16.]

[16] 朱格利, 林万涛, 曹艳华. 用WRF模式中不同云微物理参数化方案对华南一次暴雨过程的数值模拟和性能分析[J]. 大气科学, 2014, 38(3): 513-523. [Zhu Geli, Lin Wantao, Cao Yanhua, et al. Numerical simulation of a rainstorm event over south china by using various cloud microphysics parameterization schemes in WRF Model and its performance analysis[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(3): 513-523.]

[17] 丁明月, 王俐俐, 辛渝, 等. WRF云微物理参数化方案对新疆暴雨模拟能力的TS评分分析[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1411-1418. [Ding Mingyue, Wang Lili, Xin Yu, et al. TS score of WRF cloud microphysical parameterization scheme to the simulation capability of precipitation in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1411-1418.]

[18] 周志敏, 崔春光, 胡扬, 等.一次梅雨锋暴雨过程数值模拟的云微物理参数化敏感性研究[J]. 大气科学, 2021, 45(6): 1292-1312. [Zhou Zhimin, Cui Chunguang, Hu Yang, et al. Sensitivity of parametrization of cloud micro physics[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(6): 1292-1312.]

[19] 邵元亭, 刘奇俊, 荆志娟. 祁连山夏季地形云和降水宏微观结构的数值模拟[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 18-23. [Shao Yuanting, Liu Qijun, Jing Zhijuan. Numerical simulation on macrophysics

and microphysics structure of the orographic cloud and precipitation in summer of the Qilian Mountains[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(1): 18−23.]

[20] 段海霞, 刘新伟, 蒲朝霞. 不同云方案对祁连山降水模拟的影响[J]. 大气科学学报, 2013, 36(3): 367−378. [Duan Haixia, Liu Xinwei, Pu Chaoxia. Cloud microphysical processes on simulation of precipitation in Qilian Mountains[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, 36(3): 367−378.]

[21] 魏倩, 隆霄, 赵建华, 等. 边界层参数化方案对一次西北地区沙尘天气过程影响的数值模拟研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 163−177. [Wei Qian, Long Xiao, Zhao Jianhua, et al. Impact of boundary layer parameterization schemes on the simulation of a dust event over Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 163−177.]

[22] Thompson G, Rasmussen R M, Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis[J]. Monthly Weather Review, 2004, 132(2): 519−542.

Selection of cloud model simulation parameters and analysis of microphysical structure characteristics of the precipitation process in the Qilian Mountains

ZHANG Wenyu[1], REN Jing[1,2], FU Danhong[2], KONG Lingbin[1], TIAN Shuo[1]

(1. College of Computer and Artificial Intelligence/School of Geoscience and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 2. Key Laboratory for Clouds and Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: Using the measured data and cloud model, the precipitation process of a typical stratocumulus system in the Qilian Mountain is numerically simulated. The influence of parameter selection on the simulation results is discussed, and its microphysical structure characteristics are analyzed. The results show that the optimal parameter of the Qilian Mountain cloud model is the Thompson scheme. The content distribution of various aquatic products shows a single peak. The values of graupel and snow mixing ratios near 01:00 and 4.5 km can reach 0.1 $g \cdot kg^{-1}$ and 0.7 $g \cdot kg^{-1}$, respectively. There is abundant supercooled water in this height layer. From the spatial distribution and temporal correlation of the five aquatic products, the melting of graupel and snow has a significant contribution to rainwater formation. In the vertical direction, the cloud system presents a layered structure of "catalysis supply": The highest layer above 8 km is the coexistence area of ice crystals and snow, and the supercooling area above the zero-layer (4.5 km), with graupel particles, cloud water, and rainwater at the same time. This cloud structure is conducive to forming precipitation and artificial precipitation enhancement in the Qilian Mountain.

Keywords: Qilian Mountains; cloud mode; simulation parameters; microphysical structure; characteristics